



L'investigazione antincendio sugli aspetti strutturali: una proposta di codifica

■ Franco Bontempi, Chiara Crosti, Marcello Mangione

L'abstract

I numerosi incendi che si innescano e danneggiano le strutture hanno rivoluzionato, da una parte, molte procedure sulla prevenzione definendo metodologie gestionali più efficaci e stanno, dall'altra, portando ad affinare procedure investigative codificate atte a ridurre il rischio di errori/omissioni durante le indagini.

Lo scopo di questo articolo è quello di esporre una metodologia codificata di Structural Fire Investigation (Investigazione sugli aspetti strutturali in caso di incendio) atta ad individuare le cause scatenanti, pregresse e latenti, che hanno determinato l'evento accidentale.

L'iter investigativo, associato a determinate operazioni strutturali e forensi che partono dalla raccolta delle informazioni iniziali al repertamento e controllo documentale per poi completarsi con le

verifiche computazionali, sicuramente aiuta a determinare, in maniera rigorosa, le cause e l'origine di un incendio. La modellazione degli incendi con il software del NIST, Fire Dynamics Simulator (FDS) e l'analisi strutturale con vari codici di calcolo, permettono di verificare determinate ipotesi maturate durante il repertamento e di avvalorare scientificamente l'analisi semiotica rilevata sulla scena, fornendo dati forensi utili in fase dibattimentale.

Quindi un'attività investigativa pianificata, permette a qualsiasi utente, (V.F., personale delle Forze dell'Ordine, Consulente, Perito, CTU o Libero Professionista), di svolgere indagini in maniera appropriata secondo una linea guida che permette di non tralasciare controlli a volte rilevanti per la stesura della documentazione complessiva in forma di report finale.

Il compito della Fire Investigation consiste nell'esaminare gli incidenti legati agli incendi con la finalità di determinarne le cause ed identificarne le eventuali responsabilità.

Creare una metodologia progettuale nell'investigazione degli incendi confinati, definita appunto "Structural Fire Investigation", vuol dire impiantare una linea guida per la conduzione di indagini di incendi in ambienti confinati partendo dalle nozioni dell'ingegneria strutturale [1]. La Structural Fire Investigation rappresenta quindi un nuovo procedimento riguardante l'esame e l'analisi dei danni fondato su una solida conoscenza della progettazione strutturale antincendio.

È la base di partenza per l'ingegnere strutturista, nella veste di investigatore, che va oltre il classico obiettivo di stabilirne le origini e le cause. Essa permette di ricavare ulteriori dati salienti utili anche per l'attività giudiziaria (durata dell'incendio, temperature massime raggiunte, distribuzione delle concentrazioni di gas tossici, ecc.) applicando principi e metodi dell'ingegneria per la risoluzione di problemi tecnici in ambito legale.

La veste dell'investigatore-antincendio si

colloca quindi appieno sia nel vasto settore dell'ingegneria strutturale antincendio e sia in ambito forense durante le procedure giudiziali civili e penali.

La codifica di una struttura investigativa

La struttura metodologica investigativa, applicabile in tutti i casi di incendi confinati, rappresenta un potenziale ausilio per le attività di Fire Investigation.

Tale struttura è stata concepita in cinque fasi specifiche e distinte ad ognuna delle quali sono state associate determinate operazioni investigative, interagenti tra loro, che dovrebbero consentire, al termine delle fasi, di definire quantomeno l'origine e le cause dell'incendio.

L'esigenza di codificare le operazioni è molto sentita negli ambienti delle forze di polizia scientifica e militari, ove l'utente, che viene interessato a condurre le indagini investigative, spesso non possiede un chiaro quadro complessivo delle operazioni e controlli da svolgere sulla scena con il rischio di by-passare determinate verifiche e quindi non re-

■ Gli Autori

Prof. Ing. **Franco Bontempi** - E' Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso la facoltà di Ingegneria Civile della Sapienza Università di Roma dal 2000. Attualmente è titolare dei corsi di "Tecnica delle costruzioni", "Costruzioni metalliche", "Progettazione strutturale antincendio". Si occupa di analisi strutturale e progettazione prestazionale di edifici alti e ponti, coordinando un gruppo di ricerca tra i più attivi nel settore del calcolo automatico e della modellazione strutturale. Ha partecipato alla redazione delle Norme Tecniche delle Costruzioni e allo sviluppo del progetto di strutture speciali quali il ponte sullo Stretto di Messina, strutture per turbine eoliche offshore, edifici alti. E' consulente per procedimenti di Ingegneri forense connessi a collassi strutturali.

Ing. **Chiara Crosti** - E' Ingegnere Civile e ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria delle Strutture presso La Sapienza Università di Roma dove svolge attività di ricerca e di didattica. Dopo due anni negli Stati Uniti presso il National Institute of Standards and Technology (NIST) di Washington è adesso CEO dello spin off di ricerca StroNGER. Si occupa di modellazione numerica e valutazione della sicurezza strutturale di edifici e ponti. E' consulente per la valutazione di capacità prestazionale di strutture. Tratta inoltre la progettazione e l'adeguamento di costruzioni a rischio incendio. Dal 2008 è assistente del Corso di "Tecnica delle Costruzioni 2" e dal 2013 del corso di "Progettazione strutturale antincendio" presso la facoltà di Ingegneria della Sapienza di Roma.

Marcello Mangione - Ingegnere civile, Ufficiale del Genio dell'Arma dei Carabinieri e dottorando presso l'Università La Sapienza di Roma. In qualità di Ufficiale del Ruolo Tecnico-Logistico presso la Direzione Lavori del Genio del Comando Generale dell'Arma dei Carabinieri di Roma, ricopre diversi incarichi tra cui anche quello di progettista e consulente antincendio su opere a destinazione prettamente militare. Dal 2014 è membro della commissione "Resistenza al fuoco/FSE dell'Ordine degli Ingegneri di Roma e Dottorando presso il Dipartimento di Strutture e Geotecnica dell'Università "La Sapienza" di Roma ove si sta occupando, con il Prof. F. Bontempi e l'Ing. C. Crosti, di Fire Investigation.

Nell'ambito della sua tesi di Dottorato sta partecipando, in qualità di relatore, a diversi seminari organizzati presso Enti pubblici e militari riguardanti il repertamento, la pianificazione scientifica delle attività investigativa-forense sugli incendi e la modellazione investigativa degli scenari d'incendio tramite l'ausilio del codice di calcolo Fire Dynamic Simulator (FDS).

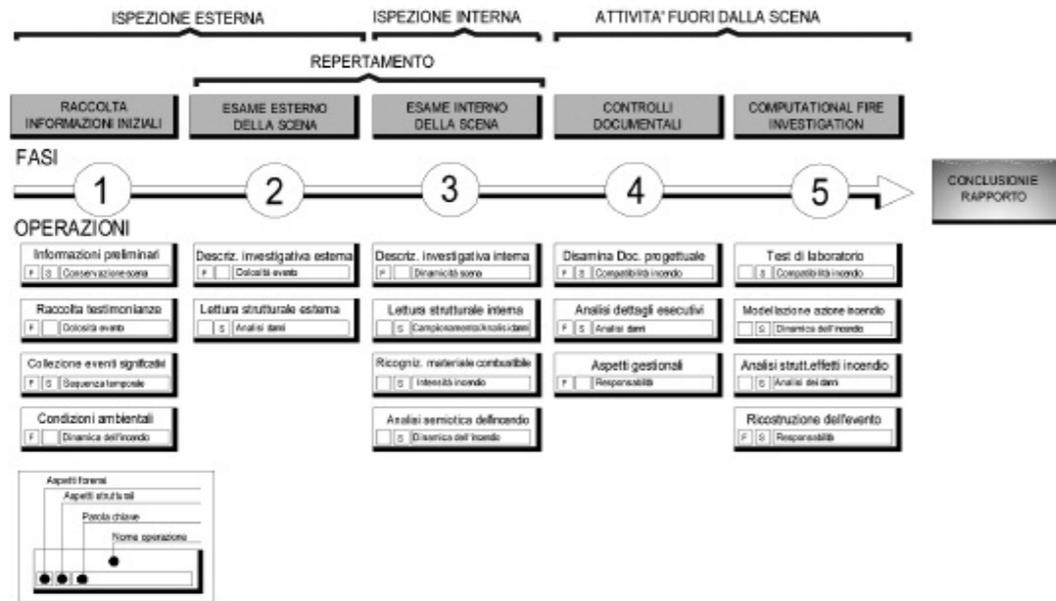


Figura 1 - Struttura investigativa suddivisa per fasi ed operazioni

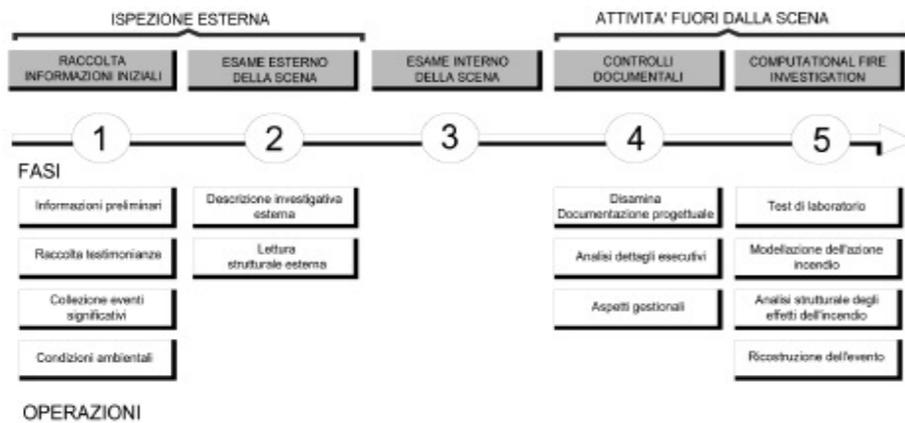


Figura 2 - Pianificazione di un'attività investigativa su una struttura collassata

partire tracce peculiari in ambito forense. Tale schematizzazione nasce dal recepimento delle informazioni iniziali, per poi passare al repertamento della scena, sia esterno che interno alla struttura, e completarsi con controlli e simulazioni dell'azione incendio [2]. La struttura complessiva dell'attività investigativa, composta da cinque fasi e diciassette operazioni, è raffigurata in *Figura 1* ove

sono stati riportate, per ognuna delle operazioni, la parola chiave e la natura, strutturale e/o forense, della stessa operazione [3]. La prima fase riguarda la raccolta delle informazioni iniziali con lo scopo di inquadrare il contesto interessato dall'evento accidentale e carpire i primi dati utili per condurre, in maniera idonea, le successive attività. Segue la disamina della scena, sia all'ester-

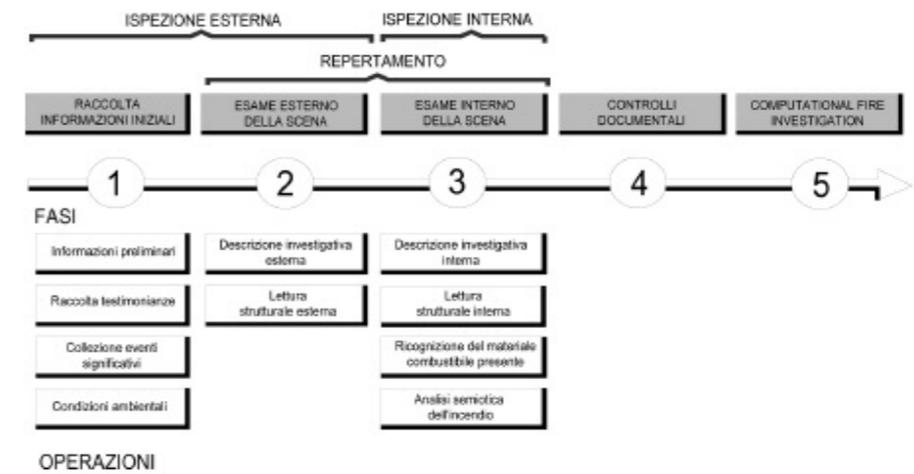


Figura 3 - Attività investigativa semplice

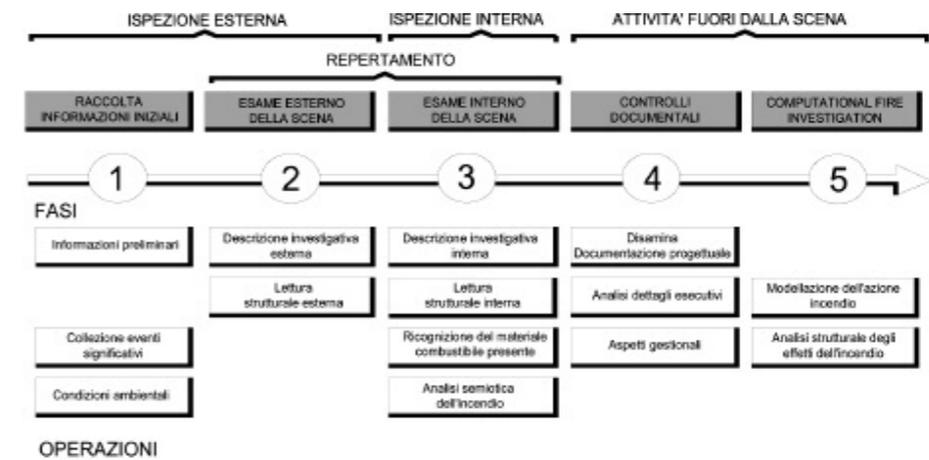


Figura 4 - Schematizzazione di un'attività personalizzata

no che all'interno, con l'attuazione di tutta una serie di operazioni che potremmo far rientrare nell'attività di repertamento vero e proprio. Queste prime fasi vengono condotte in breve tempo tenendo conto della dinamicità della scena, con prove variabili e a volte irripetibili nel tempo. Le ultime due fasi, da espletare fuori dalla scena, riguardano invece i controlli progettuali, esecutivi, (resistenza passiva ed attiva della struttura), e gestionali dell'opera per poi completarsi con la "Computational Fire Investigation" cioè l'uso di software e strumenti a

supporto di quanto rilevato al fine di modellare l'azione incendio sotto l'aspetto termofluidodinamico e strutturale nonché ricostruire la scena. Naturalmente l'investigazione può essere più o meno complessa, riguardare strutture completamente devastate da un incendio di notevole magnitudo (accident), interessare manufatti relativamente semplici o riguardare quasi incidenti (near miss). Per incendi distruttivi si può quindi ricorrere ad un'analisi della scena esterna (*Figura 2*), poiché il collasso strutturale esclude la terza fase. In altri casi l'investigazione da condurre può



Figura 5 - La raccolta delle informazioni iniziali

essere invece abbastanza semplice (Figura 3), senza la necessità di espletare le fasi 4 e 5 e quindi senza ricorrere a controlli documentali, simulazioni con FDS, modellazioni strutturali o test di laboratorio.

Ci sono inoltre delle situazioni in cui l'investigatore può condurre l'indagine personalizzandola al caso specifico come meglio rappresentato nella Figura 4. Questo comporta l'eliminazione di qualche operazione ritenuta

non necessaria. A titolo di esempio potrebbe verificarsi il caso di mancanza di testimoni sulla scena, oppure evitare test di laboratorio e la ricostruzione forense, ecc.

Fase 1: la raccolta delle informazioni iniziali

Questa fase iniziale, schematizzata in Figura

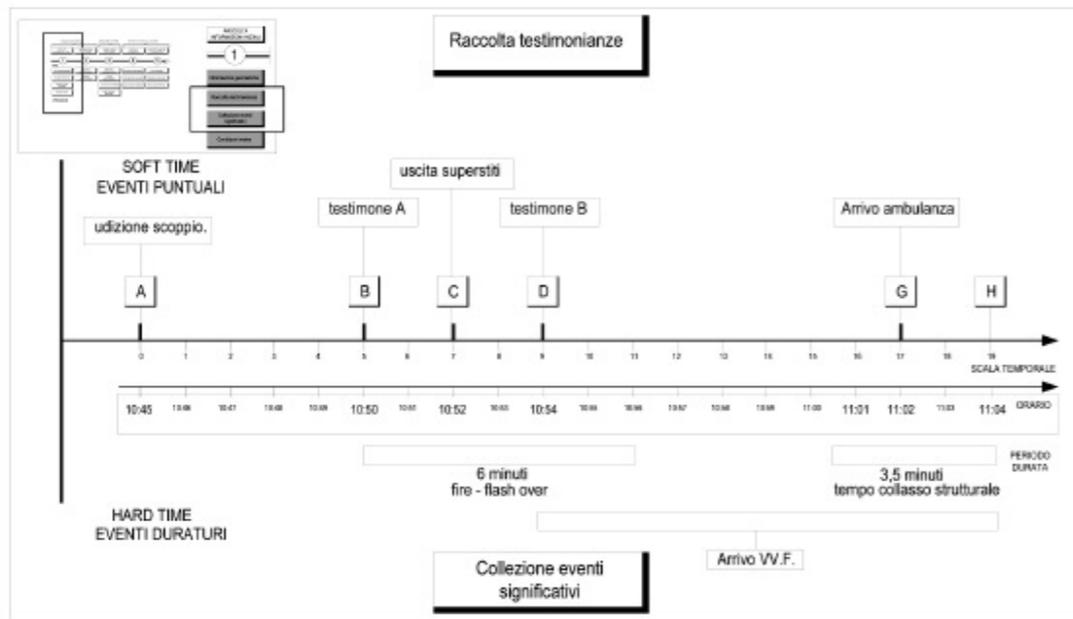


Figura 6 - Timeline di raccolta delle informazioni investigative [4]



Venting Near the Seat of the Fire

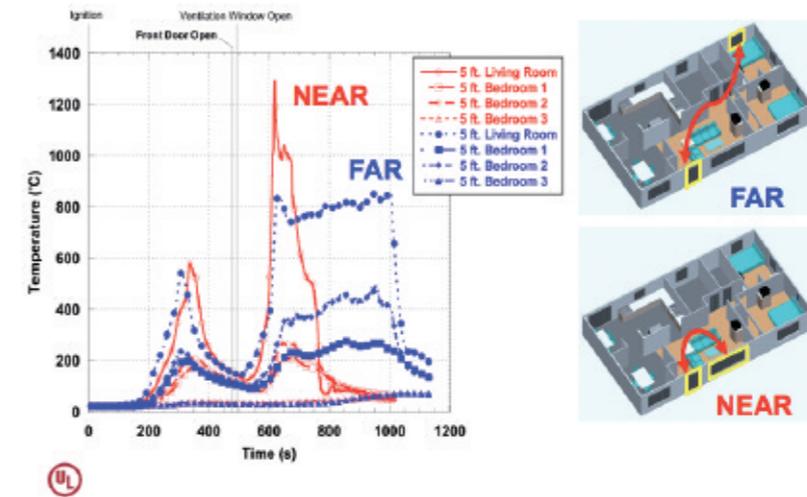


Figura 7 - Effetti del vento su un'abitazione [6]

5, parte dall'identificazione dei principali parametri che compongono la scena. Avere una prima visione della struttura da analizzare è determinante per leggere gli effetti dell'incendio e calibrare l'accuratezza delle indagini investigative. In tale fase occorre conoscere la tipologia

strutturale, materiali costitutivi, destinazione d'uso, (ad esempio abitazione in legno, capannone in acciaio, deposito in calcestruzzo, magazzino in muratura, ecc.), il numero di piani che la compongono o componevano e le sue dimensioni geometriche. Una volta acquisite le informazioni prelimina-

ri sulla scena si passa alla raccolta di dati salienti per iniziare a ricostruire l'evento accidentale. Un ruolo importante arriva ascoltando i potenziali testimoni che hanno avvertito o assistito all'incendio.

Tali informazioni devono comunque essere vagliate attentamente scartando notizie dubbiose o contraddittorie. Dalle informazioni testimoniali e dalla raccolta degli eventi più significativi è opportuno costruire una timeline così come raffigurata nella *Figura 6*, utilizzata nel corso delle indagini investigative [4].

Si tratta di costruire la parte superiore del grafico, definita soft time, in maniera puntuale, con la raccolta delle testimonianze o di eventi specifici e la parte inferiore, hard time, per la catalogazione di eventi significativi più duraturi.

Le due operazioni convergono quindi in un unico grafico definendo temporalmente un quadro sinottico di informazioni [5].

Conoscere le condizioni ambientali che cristallizzano la scena al momento dell'evento è fondamentale per la conduzione delle future attività investigative.

In particolare i dati rilevanti da conoscere sono: la temperatura, il tasso di umidità e la presenza di vento (orientamento e portata). A titolo di esempio una struttura sottoposta ad incendio e vento ha effetti completamente diversi rispetto alla stessa senza condizioni ventose, influenzando il percorso del fuoco, l'analisi semiotica e i danni strutturali rilevabili sulla scena.

Valutare quindi l'azione del vento risulta necessario per una corretta modellazione della struttura.

La *Figura 7* mostra l'influenza dell'azione del vento in una struttura.

La seconda e terza fase: il repertamento della scena

Il repertamento costituisce il cuore dell'attività investigativa che dà impulso alle altre attività che dovranno seguire. Le operazioni ispettive, sia esterne che interne (*Figura 8*) hanno lo scopo di acquisire ed analizzare molti dati tramite l'analisi semiotica degli in-

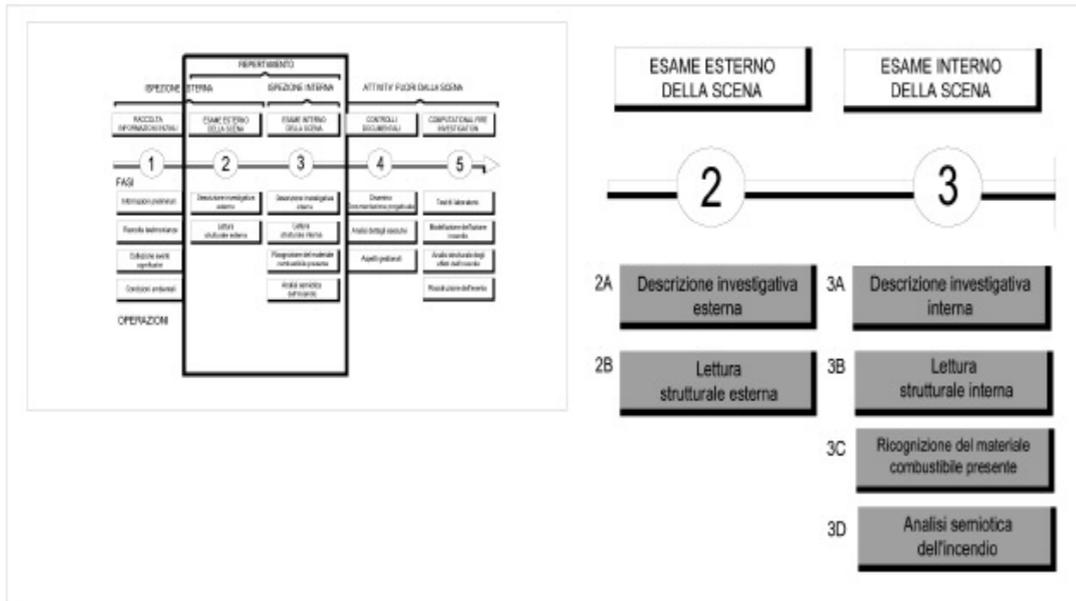


Figura 8 - Le operazioni di repertamento dell'incendio

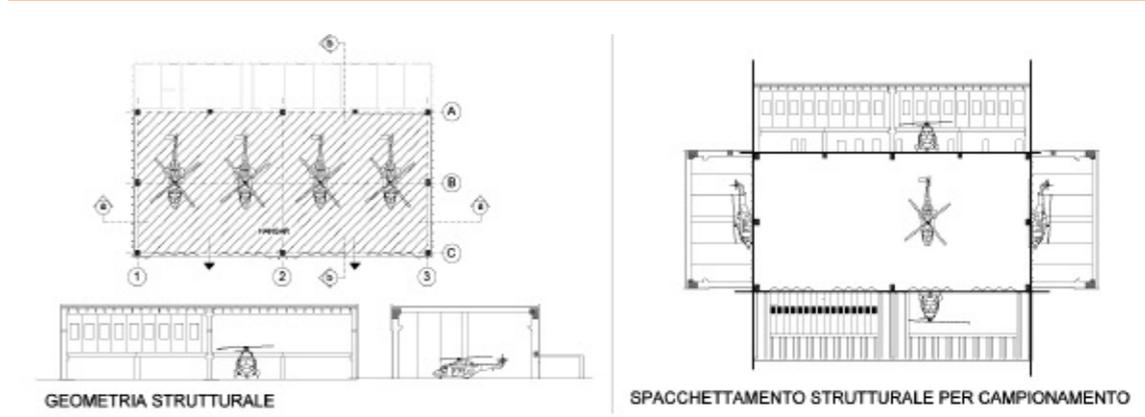


Figura 9 - Spacchettamento strutturale ai fini del repertamento

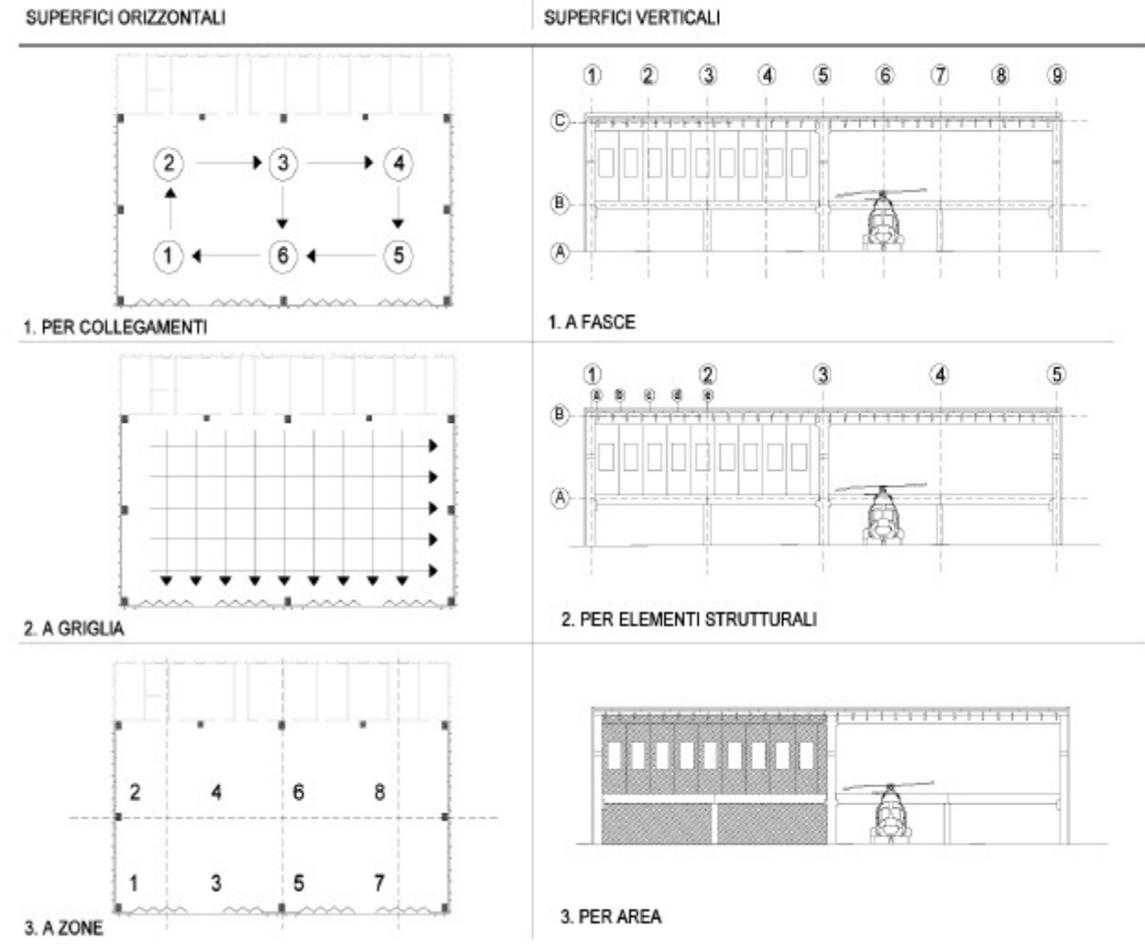


Figura 10 - Metodi di campionamento geometrico

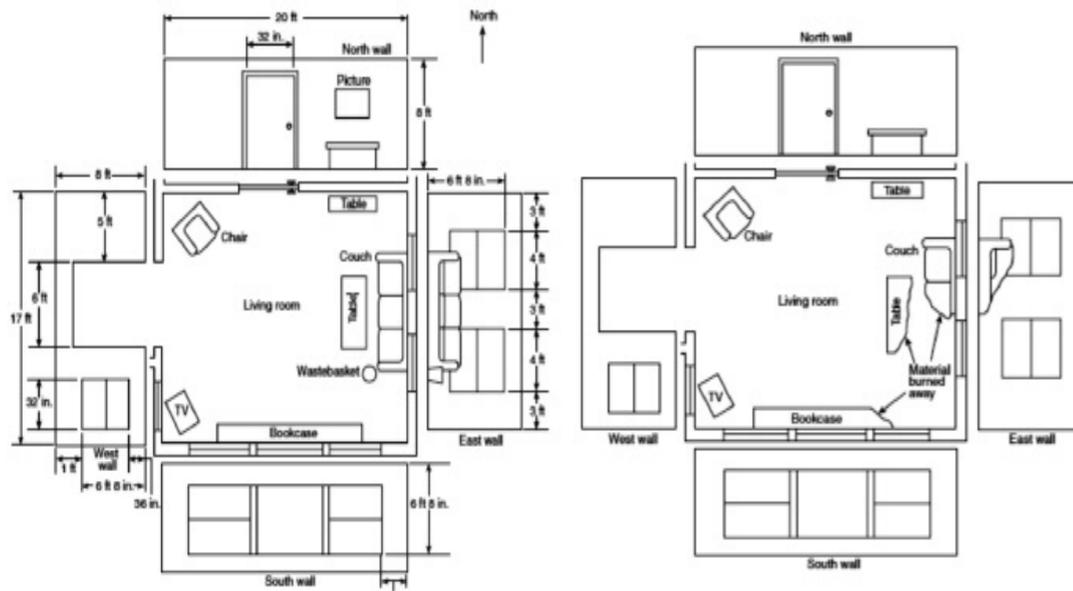


Figura 11 - Ricostruzione ante e post incendio del carico d'incendio [8]

cendi che consente di interpretare le tracce presenti sulla scena.

I criteri fondamentali ai quali deve rispondere un repertamento nell'ambito della Structural Fire Investigation sono principalmente la scelta degli elementi/parti strutturali e la localizzazione dei punti o aree di prelievo.

Il repertamento strutturale può essere selezionato essenzialmente con un campionamento mirato, cioè specifico su una determinata area strutturale o geometrico cioè completo sulla struttura. Comunque, in ogni caso, la scena, come illustrato in Figura 9, deve essere spaccettata in tutte le sue superfici strutturali orizzontali (pavimento e soffitto) e verticali (pareti).

Il campionamento mirato risulta necessario quando le tracce dell'incendio riscontrabile sulla scena ci indirizzano direttamente, senza ragionevole dubbio, su una determinata area strutturale. L'identificazione delle tracce immediatamente visibili, che permettono agli investigatori un primo orientamento, deve assicurare la raccolta anche del più piccolo dettaglio.



Figura 12 - Fotogramma 1. Segni lasciati da un incendio [9]

Le tracce di fusione o di rammollimento di determinati materiali strutturali (maniglie di ottone, bottiglie di materiale plastico, finestre in alluminio, ecc.) è un esempio di campionamento mirato.

Il campionamento geometrico invece prevede la suddivisione della struttura in un numero sufficiente di settori di campionamento. Da qui la necessità di procedere alla scelta di uno dei diversi metodi illustrati nella figura seguente.

I metodi illustrati nella Figura 10 [7] possono essere, per le superfici orizzontali, del tipo:

- per collegamenti, basato sulla teoria delle correlazioni secondo cui ogni fonte di prova conduce alla successiva. Esso è applicabile in scene d'indagine anche abbastanza grandi

- a griglia, assicura un'ispezione approfondita ma molto dispendiosa della struttura che viene suddivisa in mesh bidimensionali. Da utilizzare per scene di superficie contenuta

- a zone, per strutture con stoccaggio di carico d'incendio variegato nello stesso compartimento e consigliato per aree divisibili facilmente in sottozone indipendenti.

Nel campionamento di superfici verticali si possono adottare i seguenti metodi:

- a fasce, consigliato per strutture modulari e/o scomponibili in parti d'opera
- ad elementi strutturali, basati sull'analisi visiva e strumentale dei singoli elementi strutturali danneggiati dall'incendio

L'iter investigativo, associato a determinate operazioni strutturali e forensi che partono dalla raccolta delle informazioni iniziali al repertamento e controllo documentale per poi completarsi con le verifiche computazionali aiuta a determinare, in maniera rigorosa, le cause e l'origine di un incendio

- ad aree, utile durante l'analisi semiotica dell'incendio su superfici verticali ricche di tracce.

Durante l'ispezione interna un dato importante da rilevare è la quantificazione esatta del carico d'incendio presente e la sua porzione che ha partecipato alla combustione. Il Fire Investigator deve essere in grado di ricostruire un inventario degli oggetti riscontrabili sulla scena anche se totalmente carbonizzati.

Si sottolinea che le complicazioni investiga-

tive risiedono principalmente nella difficoltà di ricostruire con chiarezza i luoghi e il carico d'incendio con la sua reale distribuzione. Questi due elementi sono sufficienti per stravolgere e complicare ogni ricostruzione dell'accaduto ed aiutano a distinguere i danni dalla zona d'innescò con quelli di propagazione. La progettazione dell'attività investigativa richiede, in questa fase, una ricostruzione grafica quotata della scena, ante e post incendio, con un inventario dettagliato della natura del materiale combustibile presente (reazione al fuoco). Nella *Figura 11* è stata riportato un salotto, ante e post incendio, tratto dalla norma NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigations.

La ricostruzione del carico d'incendio è fondamentale per ricavare la potenza termica specifica utile per una eventuale ricostruzione computerizzata dell'incendio tramite codici di fluidodinamica computazionale.

L'analisi semiotica degli incendi impone una codifica dei segni, alcuni citati nella norma NFPA 921. In linea generale essi possono essere classificati nel modo seguente:

- segni a colonna e a clessidra (column or hourglass)

- segni a V o a cono (cone) e a cono rovescio (inverted cone) e a U e a doppia U
- segni di protezione (signs of protection)
- segni da liquidi infiammabili (signs of flammable liquids)
- segni da combustione pulita (floor jet e clean burn)
- linee di demarcazione dell'orizzonte dei fumi e del calore (line of smoke or heat).

La quarta fase: il controllo documentale

Questa fase, rappresentata in *Figura 13*, riguarda il controllo documentale della struttura suddiviso in tre livelli: progettuale, esecutivo e gestionale.

Tale attività ispettiva ha lo scopo di ricostrui-

re la vita utile della struttura a partire dal momento del concepimento sino ad arrivare al suo danneggiamento estrapolando cause scatenanti (root cause), fattori contribuenti (contributory factors), errori umani (human errors) o violazioni (violations). Questa fase rappresenta un nodo cruciale in ambito forense in quanto emergono i profili di responsabilità connessi a cause, concause ed errori latenti presenti nella struttura. Un esempio di fotogramma relativo al controllo documentale è riportato nel seguito (*Figura 14*).

La fase conclusiva: Computational Fire Investigation

Al fine di trarre le giuste valutazioni appare opportuno eseguite, in particolari casi, dei

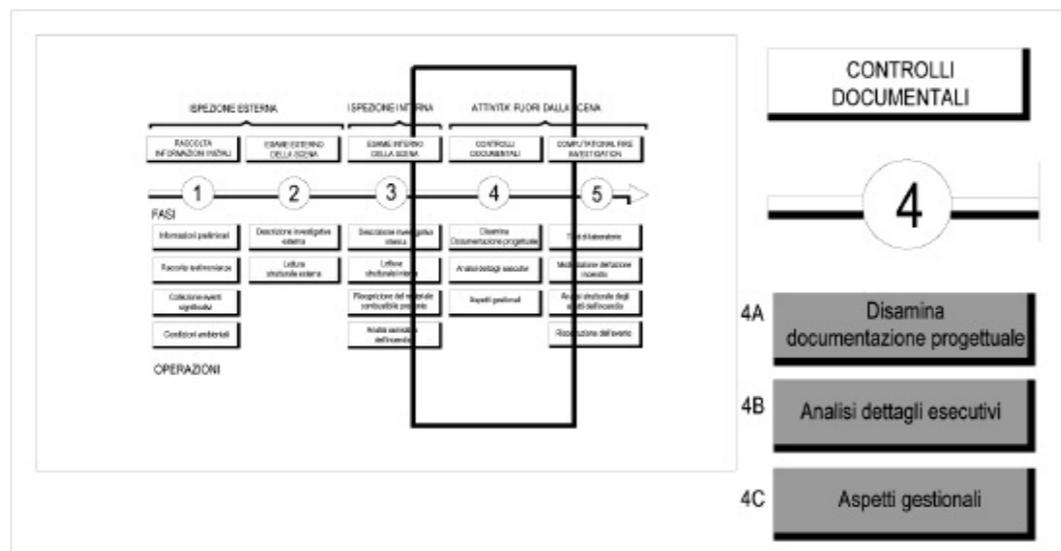


Figura 13 - Controllo documentale in fase investigativa

La modellazione degli incendi con il software del NIST, Fire Dynamics Simulator (FDS) e l'analisi strutturale con vari codici di calcolo, permettono di verificare determinate ipotesi maturate durante il repertamento e di avvalorare scientificamente l'analisi semiotica rilevata sulla scena, fornendo dati forensi utili in fase dibattimentale

test di laboratorio, modellazioni e analisi strutturali computerizzate o delle ricostruzioni per comprovare ed illustrare rigorosamente le esatte cause e concause dell'incendio. Questa quinta fase, meglio schematizzata nella Figura 15, introduce le ultime quattro operazioni.

I test di laboratorio sono necessari per valutare determinate caratteristiche termiche di materiali riscontabili sulla scena o per simulare particolari condizioni di innesco, con le dovute condizioni al contorno, al fine di verificare la compatibilità dello scenario d'incendio repertato. Si tratta spesso di capire se l'innesco di un materiale, non noto, era compatibile in determinate condizioni. La modellazione con il codice FDS ha lo scopo di simulare il reale incendio verificatosi nella struttura con lo scopo di avvalorare tutte le ipotesi ricavate nelle fasi precedenti. La modellazione quindi non ha solo lo scopo di poter progettare correttamente le strutture a livello antincendio ma anche di avvalorare ipotesi investigative [10]. Quindi gli ipotetici scenari d'incendio, in fase progettuale, diventano scenari compatibili a livello investigativo ed i risultati della

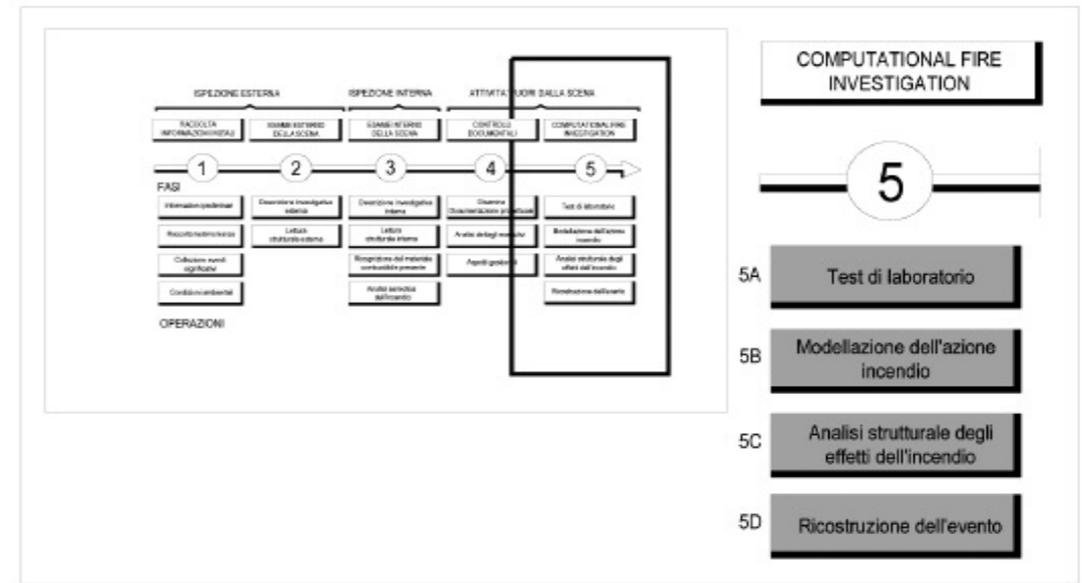


Figura 15 - La fase computazionale

Figura 14 - Fotogramma 2. Controllo progettuale, esecutivo e gestionale [9]



modellazione ci forniscono immagini comparabili con la semiotica degli incendi (Figura 17). L'analisi di parti della struttura come ad esempio un solaio o una parete portante, soggetti ad un incendio, ci fornisce invece dati ingegneristici rilevanti atti a comprovare i danni riscontrati sulla scena (collapsi, dilatazioni termiche, cedimenti strutturali, ecc.). La ricostruzione di un incendio ha invece lo scopo, specialmente nelle attività investigative con vittime, di ricomporre, con specifici software, (3D Studio max fire, faro aras 360, ecc.), la mera sequenza degli avvenimenti utili in fase giudiziaria.

Conclusioni e attività di reporting

La corretta sequenza delle cinque fasi portano al risultato finale dell'attività investigativa frutto di tutte le considerazioni riscontrate sul luogo o ricavate tramite software o strumenti specifici. Fino a quando non si incasellano tutti i dati al

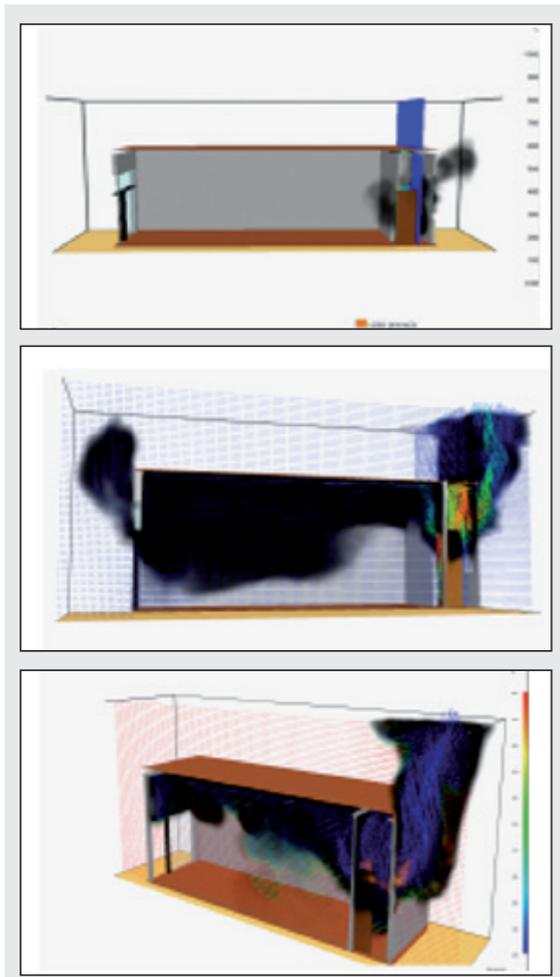


Figura 16 - Modellazione, con il codice FDS, di un incendio ai fini investigativi

posto giusto nessuna ipotesi specifica può essere ragionevolmente trattata poiché tutti gli incendi devono essere affrontati dall'investigatore senza presunzione.

La perizia conclusiva deve essere esaustiva e fornire al destinatario tutte le indicazioni certe, senza ragionevoli dubbi, al fine di evitare fallimenti in sede giudiziaria [11].

Considerazioni finali

L'identificazione del nesso eziologico è alla base dell'attività investigativa forense e tale risultato è più attendibile se l'analisi delle cause avviene in maniera corretta.

L'approccio dell'attività investigativa con le

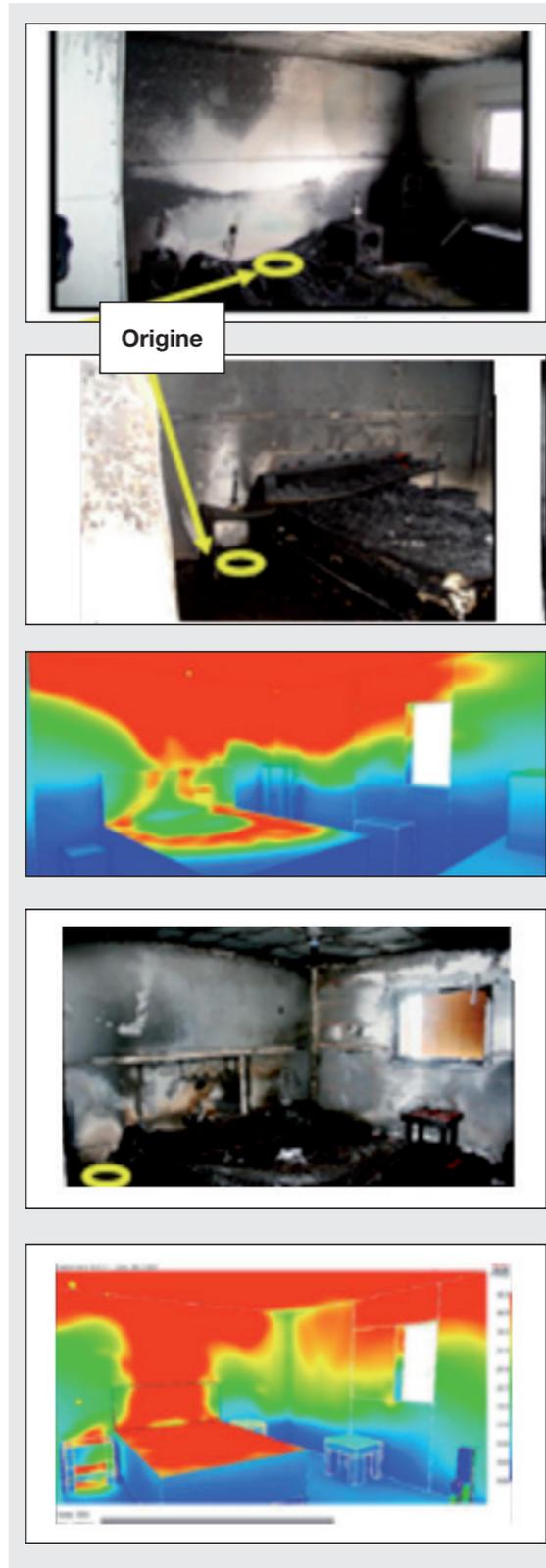


Figura 17 - Processo comparativo tra semiotica e modellazione di un incendio [5]

tecniche di back-analysis della Structural Fire Engineering permette di ricostruire la storia della struttura partendo dai danni e collassi causati dall'incendio.

Tale lavoro, se correttamente pianificato, porta ad indentificare dati strutturali significativi e dei profili di responsabilità utili per dare delle risposte attendibili ai quesiti peritali.

L'attività di Fire Investigation nell'ingegneria strutturale diventa quindi una vera e propria disciplina investigativa al pari di quella di altre discipline necessaria per tutte le attività giudiziarie ove sono coinvolte strutture danneggiate e/o collassate per effetto di un incendio fornendo valutazioni salienti in ambito forense e strutturale.

Le continue ricerche investigative strutturali, svolte nell'ottica della Reverse Engineering, potrebbero portare a definire, in futuro, nuove frontiere evolutive ed innovative, sia nell'ambito dell'ottimizzazione strutturale che della robustezza e fidatezza antincendio [12].

Si ringraziano per la stesura del presente articolo:

- i Comandanti dei VV.F. Claudio De Angelis, Michele Mazzaro e Cristina d'Angelo, per tutte le discussioni sul tema
- il Geom. Antonio Castoldi e l'ex capo squadra Gabriele Pirovano dell'Associazione Italian Fire Investigation per le immagini gentilmente concesse per l'articolo
- le persone del gruppo di ricerca diretto dal Prof. F. Bontempi dell'Università La Sapienza di Roma
- il Prof. Leonardo Corbo celeberrimo cultore dell'antincendio in Italia
- il Prof. Nicola Augenti, autorità nell'Ingegneria Forense a cui gli autori devono molti spunti.

Bibliografia

- [1] Mangione M., F. Bontempi, Crosti C.: Structural Fire Investigation e Ingegneria Forense - Atti del convegno IF CRASC'15 - 14-16 maggio 2015 - Università La Sapienza - Roma
- [2] Mangione M., Crosti C.: Fire Investigation nel tunnel del monte Bianco - Atti del convegno IF CRASC'15 - 14-16 maggio 2015 - Università La Sapienza - Roma
- [3] Bontempi F.: Ingegneria forense strutturale: basi del progetto e ricostruzione dei collassi - Relazione generale, Atti del convegno IF CRASC'15 - 14-16 maggio 2015 - Università La Sapienza - Roma
- [4] Arangio S., Bontempi F., Crosti C.: Modelli generali per la spiegazione causale di collassi strutturali - Atti del convegno IF CRASC'12 - 15-17 novembre 2012 - Università di Pisa.
- [5] Gregory E. Gorbett, Msc, CFEI, CFPS, IA-AI_CFI, MIFireE: Computer Fire Models for fire investigation and reconstruction - International Symposium on Fire Investigation Science and Technology- ISFI 2008
- [6] <http://www.fireservicewarrior.com/2012/09/the-good-and-bad-of-ventilation>
- [7] Lombardozi A.: Il IV elemento - Ed. G. Zedde - Torino
- [8] NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. Chapter 15 Documentation of the Investigation
- [9] Pirovano G.: immagini fotografiche scattate durante la propria attività ultratrentennale nei VV.F. di Lecco e gentilmente concesse per la stesura dell'articolo
- [10] Mannino E., Del Gallo A., Puccia V., Minozzi M.: Incendio in un edificio di grande altezza: confronto tra lo scenario reale e quello sperimentale. - C.do Prov.le VV.F. di Padova
- [11] Augenti N., Chiaia B. M.: Ingegneria Forense, Dario Flaccovio Editore, Ed. 2011
- [12] Bontempi F.: Appunti del corso di progettazione strutturale antincendio - Università La Sapienza Roma- A.A. 2014/2015.